

ПРИМЕНИМОСТЬ 1D-ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА В 2D-МОДЕЛЯХ: ИЗГИБ ГРАНИЦ ПЛАСТА И ВПАДИНА

Дмитрий Юрьевич Кушнир

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 139), e-mail: Dmitry.Kushnir@bakerhughes.com

Михаил Владимирович Свиридов

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 152), e-mail: Mikhail.Sviridov@bakerhughes.com

Глеб Владимирович Дятлов

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 132), e-mail: Gleb.Dyatlov@bakerhughes.com

Юлий Александрович Дашевский

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а, доктор физико-математических наук, директор, тел. (383)332-94-43 (доб. 102), e-mail: Yuliy.Dashevsky@bakerhughes.com

В работе анализируется применимость интерпретации синтетических данных электромагнитного каротажа в рамках инверсии на основе одномерной слоистой модели пласта с плоскопараллельными границами. Синтетические данные получены с помощью 2D-моделирования. Рассмотрены две модельные задачи: пласт с изгибом границ и впадина. Показано, что интервал, на котором в результате 1D-инверсии получается несогласованная модель, может достигать 10–20 м в зависимости от параметров моделей. На этом интервале предполагается использование интерпретации в рамках 2D-модели.

Ключевые слова: электромагнитный каротаж, геонавигация, интерпретация данных каротажа, двумерная геоэлектрической модели среды.

APPLICABILITY OF 1D-INVERSION OF RESISTIVITY DATA IN 2D-FORMATION MODELS: BOUNDARY FOLDING AND TROUGH

Dmitry Yu. Kushnir

Novosibirsk Technology Center «Baker Hughes», 630090, Russia, Novosibirsk, 4a Kutateladze St., Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 139), e-mail: Dmitry.Kushnir@bakerhughes.com

Mikhail V. Sviridov

Novosibirsk Technology Center «Baker Hughes», 630090, Russia, Novosibirsk, 4a Kutateladze St., Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 147), e-mail: Mikhail.Sviridov@bakerhughes.com

Gleb V. Dyatlov

Novosibirsk Technology Center «Baker Hughes», 630090, Russia, Novosibirsk, 4a Kutateladze St., PhD, Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 132), e-mail: Gleb.Dyatlov@bakerhughes.com

Yuliy A. Dashevsky

Novosibirsk Technology Center «Baker Hughes», 630090, Russia, Novosibirsk, 4a Kutateladze St., D. Sc., Deputy Director, tel. (383)332-94-43 (ext. 102), e-mail: Yuliy.Dashevsky@bakerhughes.com

In this paper two synthetic 2D-formation models are considered. The first model is a reservoir with an abrupt boundary folding and the second is a reservoir with a little trough. The 1D-inversion is applied to the synthetic data generated for these models. The goal is to identify an interval near the 2D-feature over which the model that reconstructed through the 1D-inversion is different from the original. The results demonstrate that, depending on the scenario, the model mismatch interval may reach 10–20 meters.

Key words: resistivity logging, geosteering, data interpretation, 2D-geolectrical formation model.

Современные приборы электромагнитного каротажа позволяют делать достаточно большое количество измерений за счет увеличения количества пар источник-приемник и рабочих частот. В данной работе моделирование проводится для двух приборов. Первый работает на частотах 400 кГц и 2 МГц и включает несколько трехкатушечных зондов для дифференциальных измерений (затухание и разность фаз) с наибольшим разносом 1 м, а также двухкатушечные зонды с Z-источником и X-приемником, которые дают азимутально-чувствительные измерения. Второй прибор работает на частотах 20 кГц и 50 кГц и включает один трехкатушечный зонд с разносом 17 м и один двухкатушечный зонд с X-источником и Z-приемником с разносом 5.75 м.

Измерения с обоих приборов используются для определения геоэлектрической модели среды вблизи скважины во время и после бурения. Один из ключевых моментов интерпретации данных – получение согласованной модели среды. Традиционным способом подбора модели является поинтервальная инверсия в рамках слоистой 1D-модели среды с плоскопараллельными границами [1]. Производительность такой инверсии позволяет делать интерпретацию данных каротажа во время бурения. Применимость 1D-инверсии подтверждается огромным количеством полевых примеров [2, 3].

В более сложных геологических условиях слоистая одномерная модель среды недостаточна для описания 2D- и 3D-структур, например, в случае выклинивания пласта, сброса пласта, субвертикального разлома, стратиграфического несогласия и др. Подробный обзор по данной проблеме можно найти в работах [4–6]. В сложных ситуациях традиционная 1D-инверсия не обеспечивает приемлемого согласования измеренных и модельных измерений и согласованности моделей на соседних интервалах скважины. Интерпретация данных, основанная на более сложных моделях среды, требует значительных вычислительных ресурсов и не может быть напрямую применима к данным всей траектории скважины. Поэтому важно определить, в каких случаях достаточна 1D-инверсия, а в каких необходимо применять более сложную модель для интерпретации.

В данной работе рассматриваются две синтетических 2D-модели, построенные на основе реальных полевых данных. Говоря о 2D-модели, мы предпо-

лагаем, что сопротивление не зависит от координаты y , а в проекции x, z все разбивается на области с постоянным сопротивлением прямыми или ломаными. Синтетические сигналы для этих моделей получены с помощью алгоритма, изложенного в работе [7]. Заметим, что алгоритм дает возможности для 2.5D-моделирования, т. е. прибор может принимать любое положение в 3D-пространстве, но здесь мы этой возможностью не пользуемся.

Для обеих моделей применяется следующий алгоритм 1D-инверсии. Веса всех измерений при вычислении невязки равны. Траектория скважины разбивается на подынтервалы по 2 м. На крайнем левом интервале задается стартовая модель из трех слоев с одинаковым удельным электрическим сопротивлением (далее УЭС) 5 Ом·м. Подбирается 6 параметров: 3 УЭС, 2 положения границ слоев, угол наклона слоев относительно траектории. Далее подобранная модель берется в качестве стартовой на следующем интервале и т. д. Таким способом вдали от 2D-неоднородности восстанавливается близкая к истинной модель. В области 2D-неоднородности подынтервалы для 1D-инверсии уменьшаются до 0.5 м, при необходимости добавляются новые слои.

Первая 2D-модель – это низкопроводящий пласт с резким изгибом границ без нарушения непрерывности пласта. Угол изгиба границ является параметром и изменяется от 5 до 30 градусов. Рассмотрены две ситуации: 1) в точке изгиба пласта траектория скважины полностью проходит в продуктивном пласте; 2) траектория скважины дважды пересекает границу пласта.

В случае прохождения траектории скважины внутри пласта 1D-инверсия в рамках трехслойной модели работает достаточно хорошо и дает согласованную модель даже при максимальном значении угла, равном 30 градусов.

Если траектория скважины пересекает границу пласта, то 1D-инверсия не обеспечивает согласованную модель пласта в области изгиба. Более того, 1D-инверсия может привести к неоднозначным результатам. На рис. 1 (сверху) приведены две модели, полученные для одних и тех же синтетических сигналов в случае пласта с изгибом 10 градусов, истинная модель показана пунктиром. На этом же рисунке снизу приведены затухание и разность фаз, пересчитанные в значения кажущегося сопротивления (далее КС), для некоторых частот и разносов. Если для каждой из двух моделей посчитать невязку сигналов с сигналами, полученными при 2D-моделировании, то значения будут сопоставимы. С точки зрения невязки эти две модели эквивалентны. Интервал несогласованности моделей 1D-инверсии с истинной моделью находится в пределах 14–24 м по оси X . При увеличении угла изгиба до 30 градусов длина этого интервала возрастает до 20 м.

Второй пример 2D-модели – низкопроводящий пласт с небольшой впадиной (10 м в ширину). Амплитуда сброса пласта изменяется от 0.5 до 1.5 м. Траектория скважины проходит на расстоянии 1 м от верхней границы пласта. На рис. 2 (слева) показан результат 1D-инверсии в рамках трехслойной модели среды, когда траектория скважины проходит внутри границ пласта (сброс пласта 0.5 м). Модель в целом согласована, если судить по соседним полуметровым интервалам. Положение нижней границы пласта в области впадины определяется с некоторой ошибкой.

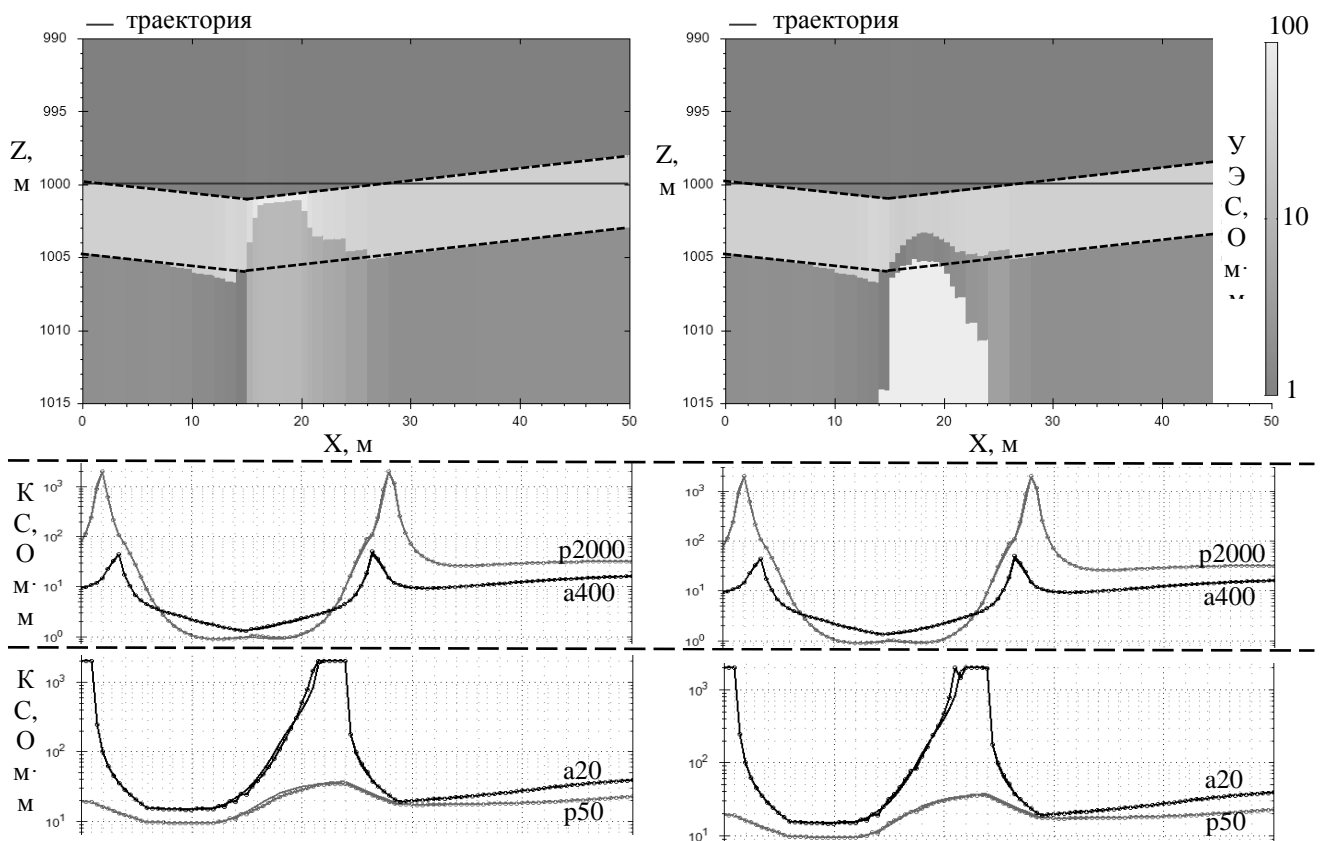


Рис. 1. Результаты интерпретации (сверху), полученные в результате 1D-инверсии данных для модели пласта с изгибом 10 градусов в рамках трехслойной модели среды в области изгиба (слева) и четырехслойной модели (справа). Пунктиром показана истинная модель (толщина пласта – 5 м, УЭС сверху вниз: 1, 30, 2 Ом·м). Снизу приведены значения КС для истинной модели (сплошная линия) и полученные в результате инверсии (линия с маркерами -o-): p2000 – разность фаз, 2 МГц; a400 – затухание, 400 кГц; a20 – затухание, 20 кГц; p50 – разность фаз, 50 кГц

На рис. 2 (справа) показан один из результатов 1D-инверсии, когда траектория скважины пересекает границу пласта (сброс пласта 1.5 м). Видно, что в области впадины на интервале 14–32 м по оси X полученная 1D-модель не согласуется с истинной (показана пунктиром). Более того, 1D-модель внутренне не согласована на соседних полуметровых интервалах, так как изменяется количество слоев в модели и значительно меняется толщина пласта.

В приведенных синтетических примерах моделей пластов с изгибом границ и впадиной мы применили 1D-инверсию для синтетических сигналов, полученных с помощью 2D-моделирования. Во всех случаях определен интервал вблизи 2D-особенности, на котором истинная модель отличается от полученной в результате 1D-инверсии. В зависимости от параметров 2D-модели этот интервал может достигать 20 м. Показано, что 2D-неоднородности начинают суще-

ственно влиять на измерения при пересечении траекторией скважины границ пласта, при этом пересекаемая и ближайшие границы определяются достаточно точно в результате 1D-инверсии. Для определения положения дальних границ модели предлагается использовать инверсию в рамках 2D-модели.

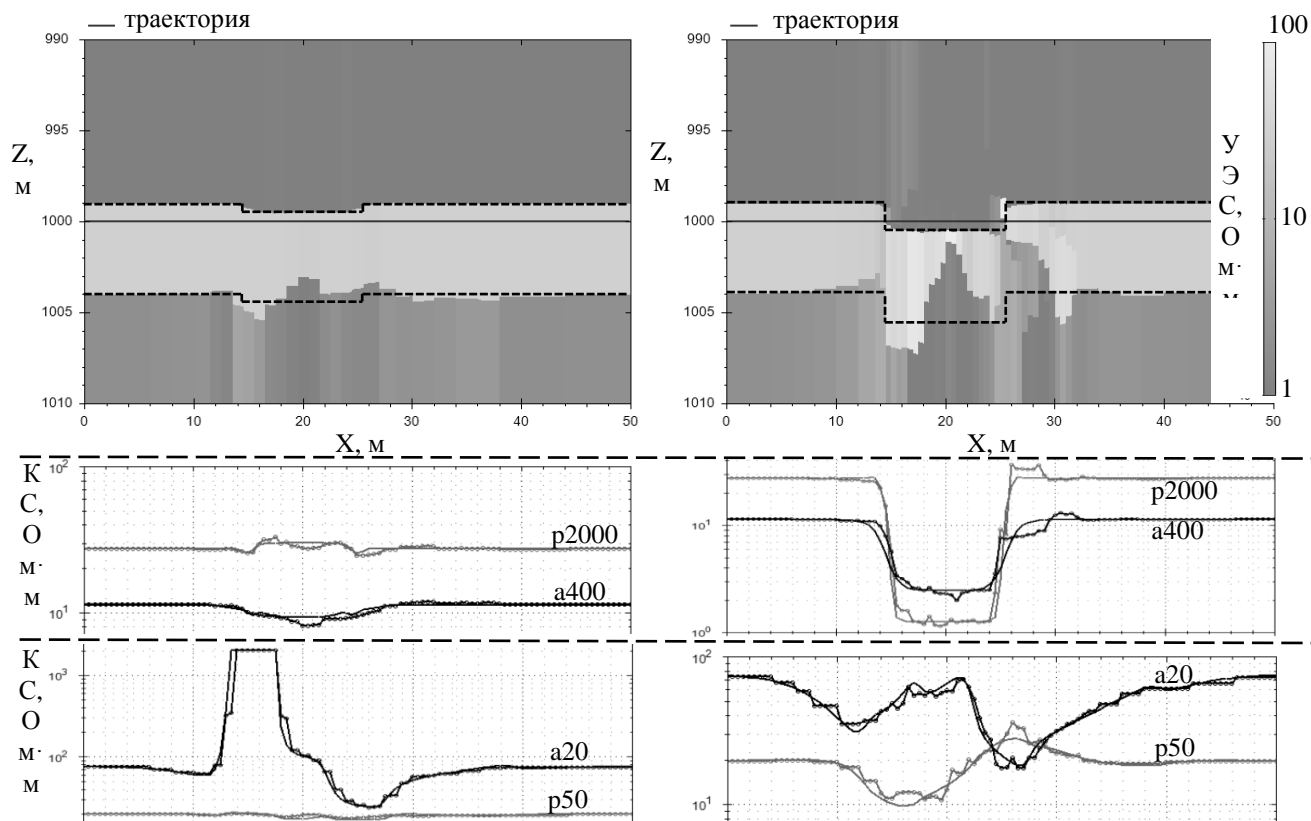


Рис. 2. Результаты интерпретации, полученные в результате 1D-инверсии данных модели пласта с впадиной в случае сброс 0.5 м (слева) и 1.5 м (справа). Пунктиром показана истинная модель (толщина пласта – 5 м, УЭС сверху вниз: 1, 30, 2 Ом·м).
Остальные обозначения такие же, как и на рис. 1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. New Software for Processing of LWD Extradep Resistivity and Azimuthal Resistivity Data / M. Sviridov, A. Mosin, Yu. Antonov et al. // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2014. – Vol. 17. – P. 109–127.
2. Navigating and Imaging in Complex Geology with Azimuthal Propagation Resistivity While Drilling / C. Bell, J. Hampson, P. Eadsforth et al. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, September 24-27, 2006. – SPE-102637.
3. Improving Well Placement and Reservoir Characterization with Deep Directional Resistivity Measurements / M.V. Constable, F. Antonsen, P.A. Olsen et al. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 8-10, 2012 – SPE-159621-MS.

4. Avdeev D.B. Three-dimensional electromagnetic modeling and inversion from theory to application // *Surveys in Geophysics*. – 2005. – Vol. 26. – P. 767–799.
5. Inversion-based workflow to image faults crossed by the wellbore using deep directional resistivity provides new way of understanding complex formations / C. Dupuis, D. Omeragic, Y.-H. Chen, T. Habashy // *SPWLA 55th Annual Logging Symposium*, Abu Dhabi, UAE, May 18-22, 2014. – SPWLA-2014-WWW.
6. Workflow to Image Unconformities with Deep Electromagnetic LWD Measurements Enables Well Placement in Complex Scenarios / C. Dupuis, D. Omeragic, Y.-H. Chen, T. Habashy // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, Louisiana, USA, 30 September–2 October, 2013. – SPE 166117.
7. Dyatlov G.V., Onegova E.V., Dashevsky Yu.A. Efficient 2.5D electromagnetic modeling using boundary integral equations // *Geophysics*. – 2015. – Vol. 80 (3). – P. 163–173.

© Д. Ю. Кушнир, М. В. Свиридов, Г. В. Дятлов, Ю. А. Дашевский, 2017